

초정밀 온도센서의 저온 영역 교정 장치 개발

양인석 · 송창호 · 강기훈 · 김용규[†]

Development of the calibration system for very accurate thermometers at low temperatures

Inseok Yang, Chang Ho Song, Kee Hoon Kang, and Yong-Gyoo Kim[†]

Abstract

For the accurate calibrations of thermometers at low temperatures, triple points of oxygen and argon have been realized using sealed-type triple point cells. The triple points were realized with both adiabatic and continuous heating methods. The resistance of three capsule-type standard platinum resistance thermometers were measured at the triple points of oxygen, argon, mercury and water for the calibrations of these thermometers in the range from $-220\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$. The extended uncertainty, with the coverage factor of 2, of the calibration in this range is smaller than 1 mK.

Key Words : temperature standards, low temperatures, triple point of oxygen, capsule type SPRT

1. 서 론

국제온도눈금-1990(International Temperature Scale of 1990, ITS-90)에서 정하는 온도 표준은 $-248.593\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 $961.78\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 넓은 구간에 대해 표준백금저항온도계(Standard Platinum Resistance Thermometer, SPRT)를 사용하여 정의된다^[1]. 또한 각 SPRT마다 그 저항 특성이 다르므로 열역학적 온도의 정의에 사용되는 물의 삼중점을 비롯하여 평형수소, 네온, 산소, 아르곤, 수은의 삼중점, 갈륨의 용융점, 인듐, 주석, 아연, 알루미늄, 은의 응고점을 이용하여 이러한 SPRT의 저항값을 기준값에 대한 편차값으로 측정함으로써 교정하도록 정해져 있다. 이 중 $-218.791\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 온도 영역은 산소, 아르곤, 수은, 물의 삼중점에서의 SPRT 저항값 측정을 이용하여 온도계를 교정하게 된다. 따라서 이 영역에서 초정밀급 온도계의 교정을 위해서는 이러한 삼중점을 실현하고 정밀한 온도계를 이용하여 그 점에서 온도를 측정할 수 있는 시스템이 개발되어야 한다.

한국표준과학연구원에서는 저온 영역의 ITS-90 실현을 위하여 이러한 저온 삼중점 실현장치를 개발한 바 있다^[2]. 하지만, 이 실현 장치는 개방형 삼중점 실현 장치로서 시료의 종류가 바뀔 때마다 장치 내부에 흡착된 미량의 시료들을 제거하기 위하여 장시간에 걸쳐 용기와 기체조작장치의 연결관들을 가열하고 진공장치를 이용하여 세척해야 하므로 실험에 대단히 많은 시간과 노력이 소요된다. 따라서 이러한 실현장치는 최상위의 일차 표준기로서 국가의 온도 표준을 다른 나라의 표준과 상호 비교하는 것에는 적합하지만, 이렇게 확립된 표준을 바탕으로 초정밀급의 온도계를 교정하는데는 적합하지 않다. 초정밀급 온도계 교정을 위해서는 상온에서 약 50 기압에 해당하는 높은 압력의 기체 시료를 봉입하여 낮은 온도에서 삼중점을 실현하는 밀봉형 삼중점 실현장치가 연구되어 왔다.

본 연구에서는 캡슐형의 백금저항 온도계의 교정을 위해 제작된 산소와 아르곤의 밀봉형 삼중점의 실현장치를 개발하여 저온 구간에서 초정밀 온도계를 교정하였다. $-220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 구간의 교정을 위하여 통상적으로 사용하는 수은과 물의 삼중점도 실현되었다. 이러한 밀봉형 삼중점 실현을 통하여 본 구간에서 신뢰 구간 95%에서 불확도 1 mK 이내로 온도계를 교정하는 것이 가능하다.

한국표준과학연구원 기술표준본부(Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science)

[†]Corresponding author: dragon@krisss.re.kr

(Received : January 14, 2008, Revised : February 15, 2008, Accepted : March 17, 2008)

2. 이 론

표준백금저항 온도계는 ITS-90에 정해진 내삽표준기로서 온도 T_{90} 에서의 온도계 저항값 $R(T_{90})$ 를 물의 삼중점에서의 온도계 저항값 $R(273.16\text{ K})$ 로 나눈 저항비 $W(T_{90})=R(T_{90})/R(273.16\text{ K})$ 을 이용하여 온도를 정의한다. 수소의 삼중점인 13.803 3 K에서 물의 삼중점인 273.16 K까지의 온도 영역에서의 표준백금저항 온도계의 저항비와 온도와의 기준 상관 함수는 다음과 같다^[1].

$$\ln[W_i(T_{90})] = A_0 + \sum_{i=1}^{12} A_i \left[\frac{\ln(T_{90}/(273.16\text{ K})) + 1.5}{1.5} \right]^i \quad (1)$$

여기서 T_{90} 는 ITS-90에 따른 온도를 나타내며 $W_i(T_{90})$ 는 온도 T_{90} 에서의 표준백금저항 온도계의 저항값과 물의 삼중점에서의 저항값의 기준비를 나타내며 A_i ($i=0, 1, \dots, 12$)는 ITS-90에서 정해 놓은 상수이다. 그리고 온도 스케일을 정의하는데 이용한 고정점들에서 $W_i(T_{90})$ 값도 ITS-90에서 상수값으로 정해져 있다.

또한 ITS-90에서는 개개의 표준백금저항온도계마다 온도-저항비의 특성이 조금씩 다르므로 각 온도계의 고정점에서의 값을 측정하여 정해진 형태의 편차함수의 계수를 산출하고 그 편차함수에 따라 온도-저항비의 합수를 도출하도록 하였다. 산소의 삼중점 (54.358 4 K)과 물의 삼중점 구간에서의 편차함수는 다음과 같다^[1].

$$\Delta W = W(T_{90}) - W_i(T_{90}) \quad (2)$$

$$= a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + c_1[\ln W(T_{90})]^2$$

$W_i(T_{90})$ 는 각 고정점에서 ITS-90에 의해서 정의되어 있으므로, 식 (2)의 편차함수를 이용하여 T_{90} 가 산소, 아르곤, 수은의 삼중점일 때 각각 적용하면 미지수가 세 개(a, b, c_1)인 삼원일차연립방정식이 세 개 생성되어, 편차함수의 계수 a, b, c_1 를 구할 수 있다. 따라서 산소-물의 삼중점 구간에서 편차함수가 계산된다. 기준 함수와 편차함수를 결합하면 이 구간에서 온도와 표준 백금저항온도계의 저항비의 관계가 도출된다.

3. 실험 방법

3.1. 밀봉형 저온 삼중점 셀

이 실험을 위하여 그림 1에서 보여진 바와 같은 이탈리아의 표준기관인 IMG C에서 제작된 산소와 아르곤 삼중점 셀을 사용하였다(각 S/N: 1402 1999-11-16, 10Ar 1999-08-27)^[3]. 이 셀들은 각각 1999년 11월 16일과 8월 27일에 봉입되었으며 ITS-90에서 정한 온도

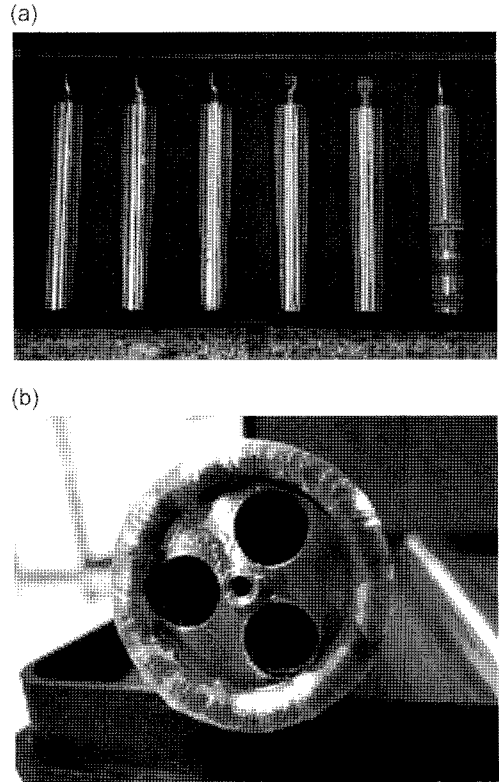


그림 1. (a) IMG C에서 제작한 밀봉형 저온 삼중점 셀 (b) 저온 삼중점 셀의 온도계 우물 입구
Fig. 1. (a) Sealed-type cryogenic triple point cells made by IMG C, Italy (b) The openings of thermometer wells of the cryogenic triple point cell.

에서 95 %의 신뢰구간으로 0.2 mK 이내에서 일치하는 것으로 평가되어 있다. 그림 1(b)에서 보는 바와 같이 3개의 캡슐형 SPRT를 동시에 온도계 우물에 장착하고 교정할 수 있도록 만들어져 있다.

3.2. 저온장치

산소와 아르곤의 삼중점 실현을 위하여 우선 밀봉형 셀의 온도를 해당 온도인 $-218.791\text{ }^{\circ}\text{C}$ 와 $-189.344\text{ }^{\circ}\text{C}$ 부근으로 낮추어 주는 냉각 장치를 제작하였으며 그 도면은 그림 2에서 보인 바와 같다. 본 연구에서는 헬륨 냉동기를 이용한 냉각 시스템을, 자체 제작한 진공 챔버에 부착하여 밀봉형 셀과 그 부근을 냉각하였다. 본 장치는 더 낮은 온도 영역을 위하여 액체 헬륨을 이용하여 냉각할 수 있도록 하였다. 그러나, 액체 헬륨을 사용하지 않더라도 실험에 필요한 정상적인 열로드인 밀봉형 셀 한개와 캡슐형 SPRT 3개를 장착하였을 때 최저온도를 17 K까지 낮출 수 있으므로, 네온의 삼중

점(24.556 1 K)까지는 액체 헬륨을 사용하지 않고도 실현 가능할 것으로 보였다. 저온 장치 내부의 온도 구배 측정을 위해서 정밀도 0.01 K의 3개의 실리콘 다이오드 온도계(미국 Lakeshore 사, 제품명: DT-470)가 그림 2와 같이 장착되었다. 이 중 Diode 1과 Diode 2는 각각 1차와 2차 캔의 온도를 감시하는데 이용되었다. Diode 3를 이용하여 측정된 온도는 온도 조절기를 이용하여 Heater2와 함께 3차 캔의 온도를 조절하는데 사용되었다. 실리콘 다이오드 온도계는 Lakeshore 사의 온도 모니터 model 218을 이용하여 측정하였다. Model 218의 사용 가능한 8채널 중 한 채널은 상온에 놓여진 실리콘 다이오드 온도계를 읽고, 두 채널은 그림 2의 Diode 2와 3을 실시간으로 읽으며 기록하였다. Heater1는 그림 2에서 보는 것과 같이 밀봉형 셀에 직접 감겨져서 셀에 일정한 양의 줄(Joule)열을 가해주는데 이용되었다. 같은 삼중점 셀을 실현하더라도 주변의

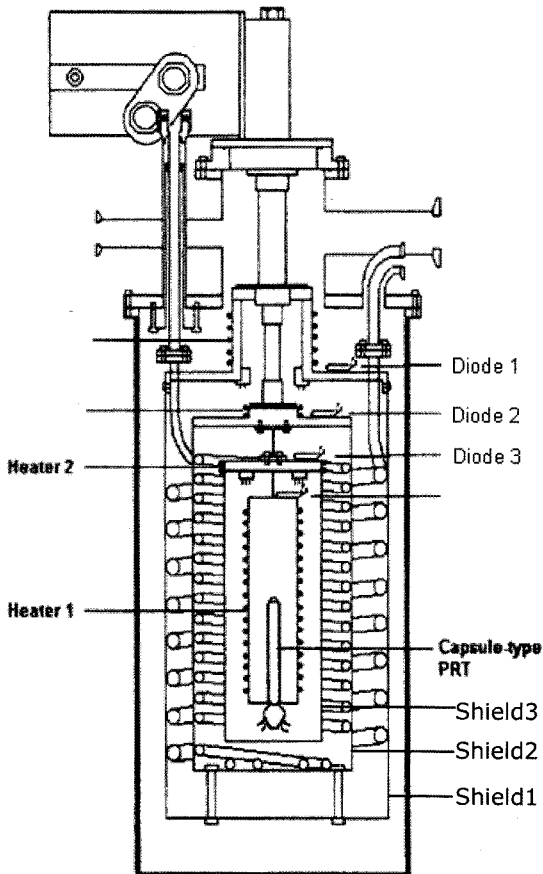


그림 2. 저온 밀봉형 삼중점 실현 장치 설계도
Fig. 2. Schematic diagram of the system for the realization of the cryogenic sealed cells.

온도 환경에 따라 그 평탄부의 온도 폭이 다르게 나올 수 있어 삼중점 실현시에는 최대한 단열과정에 가깝게 3차 캔의 온도를 제어하는 것이 중요하다. 이를 위하여 Lakeshore 사의 온도제어기 model 340이 사용되었다. 이 제어장치와 실리콘 다이오드 온도계를 이용할 경우 온도 제어의 분해능은 1 mK이다. 본 실험에서 제작된 실험 장비에 장착하였을 때 3차 캔의 온도가 정해진 온도에서 2 mK 이내에서 항상 제어가 가능하였으므로 저온 삼중점을 실현하기에 충분하였다.

3.3. 표준백금저항온도계

본 실험에 사용한 밀봉형 셀은 3개의 캡슐형 SPRT를 한꺼번에 교정할 수 있으므로 실험의 효율을 높이기 위하여 3개의 SPRT가 사용되었다. 이 중 2개의 SPRT는 영국의 Tinsley 사에서 제작된 model 5187L로서 일련번호가 각 B212, B254였으며 나머지 한개는 미국의 Hart 사에서 제작한 model 5695로서 일련번호 9509였다. 각 SPRT는 물의 삼중점에서의 명칭저항이 모두 25 Ω이나 실제 측정에서는 약 24.7 Ω에서 25.5 Ω까지 다양하게 나타났다.

3.4. 측정기

표준백금저항온도계의 저항 측정을 위하여 0.02 ppm의 정밀도를 갖는 영국 ASL 사의 정밀 저항비 브리지 model F900이 사용되었다. 표준저항은 영국 Tinsley사의 명칭 저항 25 Ω 저항과 100 Ω 저항이 사용되었다. 저항비 브리지를 이용하여 SPRT와 표준저항의 교류 저항비를 소수점 아래 아홉자리까지 정밀하게 측정할 수 있으며 표준저항이 교정되어 있으므로 SPRT의 저항값을 정밀하게 측정할 수 있다. 저항 측정을 위하여 4선식 측정 방법을 이용하였으며 표준 저항의 온도에 따른 저항값 변화를 줄이기 위하여 표준 저항을 온도 25.0 °C에서 0.1 °C 이내의 온도로 유지되는 항온조에 담그어 사용하였다. 저항비 브리지 F900을 이용하여 측정된 저항비는 자체 제작된 자동 데이터 획득 프로그램을 통하여 컴퓨터로 읽고 저장하도록 하였다. 세 개의 SPRT의 저항값을 번갈아 가면서 측정하기 위하여 컴퓨터로 자동제어 가능한 스위칭 시스템 SB148/158 (영국 ASL 사)를 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

저온 삼중점을 실현하는 일반적인 방법은 heat-pulse를 이용한 중단열과정을 이용하는 것이다. 이는 삼중점 셀의 주변 온도를 삼중점의 온도 이하에서 삼중점 온

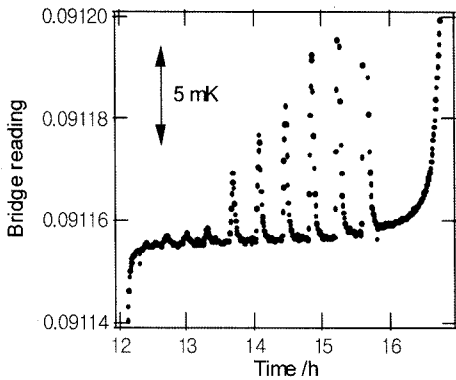


그림 3. Heat-pulse 방법을 이용하여 산소 삼중점을 준단 열 과정으로 실현한 결과
 Fig. 3. The result of the quasi-adiabatic realization of the triple point of oxygen using heat-pulse method.

도와 매우 가깝게 설정해 놓은 상태에서 셀에 직접 감긴 히터를 이용하여 일정한 열을 가한 후 히터를 끄고 셀과 온도계가 평형 상태에 이르기를 기다린 후 평형 상태에서의 온도계 지시값을 측정하고 이 과정을 삼중점 실현의 전 단계에 걸쳐서 반복하는 것이다. 그림 3은 이러한 방법을 이용하여 산소 삼중점의 단일 실현 과정을 측정한 것을 SPRT B212로 측정된 결과를 나타낸 것이다. 그래프의 y-축은 브리지 측정값을 나타내고 5 mK의 변화에 해당하는 측정값을 화살표로 표시하였으며, x-축은 측정 시간을 나타낸다. 이 결과에서 알 수 있듯이 본 실험 장치에서 heat-pulse가 꺼진 후 정상상태에 도달했을 때의 표준백금저항온도계의 저항값을 이용하여 산소의 삼중점을 1 mK 보다 훨씬 작은 수준의 불확도로 측정할 수 있었다.

그림 4는 온도계의 교정을 위하여 산소 삼중점을 실현한 상태에서 SPRT B212로 측정된 결과를 나타낸 것이다. 그래프는 셀 부근의 온도를 산소 삼중점 이하로 낮추었다가 3차 캔의 온도를 수소 삼중점의 온도보다 약 0.1 K 높게 설정하여 아주 서서히 삼중점이 실현 되도록 한 것이다. 그림 4에서 보는 바와 같이 삼중점이 실현되는 약 7시간 동안 SPRT로 측정된 온도 변화는 매우 작았다. 온도계 측정값을 시간에 대하여 선형 식으로 근사하여 그 기울기에 해당하는 변화율을 계산하였을 때 7시간동안의 온도 변화는 0.006 mK에 불과하여 매우 안정한 상태인 것으로 나타났다. 또한, 모든 측정값들의 표준 편차는 0.082 mK, 이 측정값들을 이용하여 구한 평균의 표준편차는 0.003 mK으로 매우 낮게 나타났다. 따라서 이러한 요인들로 인한 산소 삼중점 실현 불확도는 매우 낮다고 평가할 수 있을 것이다.

한편, 백금저항온도계의 저항 측정을 위해서는 여기

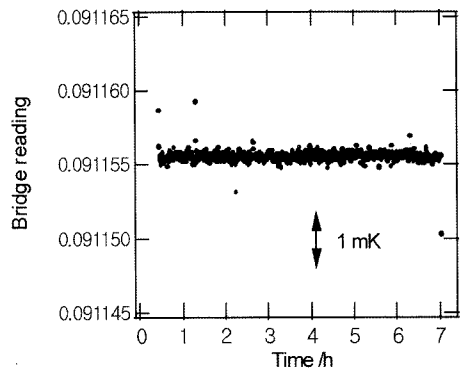


그림 4. 산소 삼중점 실현 중의 SPRT B212의 저항값을 브리지로 측정된 값
 Fig. 4. The resistance of the SPRT B212 during the realization of the triple point of oxygen measured by the bridge.

전류를 가해주는 것이 필수적인데, 이 때 흘려주는 전류에 의한 줄열로 인해 온도계의 온도가 상승하는 자기가열효과가 발생하며, 이것으로 인한 불확도 역시 고려해야 한다. 자기 가열 효과는 온도계의 구조와 주변 매질의 종류, 그리고 주변 매질의 이동 여부와 이동 속도에 따라 매우 큰 차이를 보인다. 이러한 자기가열효과 정도를 측정하기 위하여 일반적으로 측정에 사용한 여기 전류의 $\sqrt{2}$ 배에 해당하는 전류를 흘려주면 2 배에 해당하는 줄열이 발생하여 측정에 사용한 여기 전류로 인한 온도 상승의 크기를 계산해 낼 수 있다. 이러한 측정을 한 결과 측정에 사용한 1 mA의 전류에 의해 약 0.2 mK의 온도 상승이 생겼다는 것을 알 수 있다. 이로 인한 불확도는 이러한 온도 상승 효과의 약 10%인 0.02 mK 정도로 추정된다.

국제 비교 등 국가의 최고 측정 능력을 비교하기 위해서는 앞에서 언급한 실험을 통하여 여기 전류가 0 mA 일 때의 경우를 외삽하여 최종 결과를 표기하는 것이 일반적이다. 그러나, 온도계의 사용자는 온도 측정을 위해 언제나 여기 전류를 가해야 하므로, 사용자의 편의를 고려하면 고정된 여기 전류량으로 측정된 저항값을 이용하여 온도계를 교정하여 그 결과를 제시하는 것이 더욱 편리하다. 따라서 본 실험에서는 모든 삼중점에 대하여 여기 전류 1 mA를 가했을 때의 저항값을 기준으로 편차함수의 계수를 산정하였다.

표 1은 실험에서 사용된 3개의 온도계 중 하나인 B212의 산소, 아르곤, 수은, 물의 삼중점에서의 저항값 및 보정값, 그리고 보정 후의 저항비를 나타내고 있다. 보정은 2가지의 이유에서 이루어지는데, 하나는 온도계의 중심이 정확하게 삼중점 표면이 아닌 일정한 깊

표 1. 표준백금저항온도계 B212의 각 고정점에서의 보정 전후 저항과 저항비

Table 1. The Uncorrected and Corrected Resistance and the Resistance Ratio of the SPRT B212 at the Fixed Points

triple point	bridge ratio	standard resistor (Ω)	measured resistance (Ω)	corrected resistance (Ω)	W
Water	0.247 109 120	100.000 27	24.710 978 7	24.710 998 3	
Oxygen	0.091 155 480	24.999 625	2.278 852 82	2.278 848 48	0.092 221 20
Argon	0.213 793 461	24.999 625	5.344 756 35	5.344 745 73	0.216 292 95
Water	0.247 105 936	100.000 27	24.710 660 3	24.710 679 9	
Mercury	0.208 615 388	100.000 27	20.861 595 1	20.861 453 2	0.844 229 96
Water	0.247 105 425	100.000 27	24.710 609 2	24.710 628 8	

표 2. 각 삼중점에서의 기준 함수값 및 세 개의 교정된 SPRT의 저항비와 편차함수 계수값

Table 2. Reference Resistance Ratio and Resistance Ratio for Three Calibrated Thermometers at Each Triple Points and the Coefficients of Their Deviation Function

	W_r	B212	B254	9509
$W(O_2)$	0.091 718 04	0.092 221 20	0.092 134 55	0.091 786 95
$W(Ar)$	0.215 859 75	0.216 292 95	0.216 220 16	0.215 925 13
$W(Hg)$	0.844 142 11	0.844 229 96	0.844 204 82	0.844 156 59
a		-5.647 606E-4	-3.859 432E-4	-9.421 791E-5
b		-2.404 353E-5	1.116 726E-4	-5.792 628E-6
c_1		1.378 636E-6	-4.557 314E-6	-2.101 117E-6

이에서 이루어짐으로 인한 압력 효과이며 다른 하나는 교정에 사용한 수은 셀과 국제 비교 등에 사용한 국가 표준 수은 삼중점셀과의 비교로 인한 보정값이다. 보정값은 온도로 환산했을때, 산소, 아르곤, 수은, 물의 삼중점에서 각각 0.05 mK, 0.10 mK, 1.42 mK, -0.20 mK에 해당되는 값이다.

이렇게 구한 산소, 아르곤, 수은에서의 W 값과 ITS-90에서 정해 놓은 각 삼중점에서의 W_r 값을 식 (2)에 대입하여 얻은 삼원일차연립방정식을 풀면 편차함수의 계수 a, b, c_1 를 구할 수 있으며 해당 온도계에 대하여 편차함수 식을 구해낼 수 있다. 이러한 과정을 나머지 두 온도계에 대하여 동일하게 적용하여 편차함수를 구하였다. 표 2는 각 온도계의 교정점에서의 저항비와 그로부터 계산된 편차함수의 계수를 나타낸 것이다.

그림 5는 이렇게 구한 세 온도계의 편차함수를 저항비 W 의 함수로 나타낸 것이다. 그림에서 닫힌 기호는 이번 실험을 통한 각 고정점에서의 교정값에 해당하며 열린 기호는 1990년에 영국의 표준기관인 NPL에서 B212를 교정한 결과를 표시한 것이다. 그림 5에서 알 수 있듯이 모든 온도계의 편차함수는 대체로 선형적인 특성을 알 수 있다. 이는 실험에서 사용한 고정점들이 큰 문제없이 ITS-90에 정의한 온도에 매우 가깝다는 간접적인 증거이기도 하다. 온도계 중 9509는 아르곤 삼중점 이하의 온도에서는 선형적 특성에서 약간 벗어남을

보인다 이 온도계는 온도계 내부가 헬륨이 아닌 아르곤과 산소의 혼합기체로 채워져 있어서 장비의 규격상에 -200°C까지만 사용 가능하도록 되어 있으므로 아르곤의 삼중점 이하에서는 온도계 내부 기체의 액화가 시작하는 것으로 추측된다. 또한 NPL에서 1990년에 교정한 결과에 비해서 B212 온도계가 산소, 아르곤, 수은점에서 각각 9.0 mK, 7.7 mK, 3.8 mK의 변화를

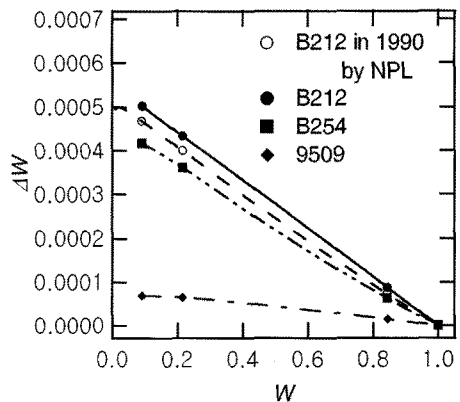


그림 5. 세 개의 교정된 온도계의 산소와 물의 삼중점 구간에서의 편차함수의 저항비에 따른 함수

Fig. 5. The deviation functions of three calibrated thermometers from the triple point of oxygen and water as functions of the resistance ratio.

표 3. (a) 산소 삼중점에서의 표준백금저항온도계 교정의 불확도 총괄표

Table 3. (a) Uncertainty Budget of the Calibration of the SPRT at the Triple Point of Oxygen

Uncertainty components	Uncertainties (mK)
sealed cell uncertainty	0.1
determination of the plateau value	0.05
plateau repeatability	0.1
self-heating	0.02
heat-flux	0.15
standard resistors	0.01
hydrostatic head correction	0.015
propagation from TPW uncertainty	0.01
combined uncertainty ($k=1$)	0.21
expanded uncertainty ($k=2$)	0.43

보였음을 알 수 있다. 이 결과 역시 온도계의 변화가 저항비 R 에 대해 대체로 선형적이므로 이번 실험의 정확성에 관한 간접적인 증거가 된다. 또한 교정이 수행된 1990년과 2007년 사이의 17년간의 변화의 크기를 고려했을 때 일반적인 빈도로 사용되는 저온용 표준백금저항온도계에 대하여 대체로 1 mK 이내의 정확도로 산소의 삼중점까지 사용하려면 대체로 2년마다 한번씩 교정이 이루어져야 한다는 것을 알 수 있다.

표 3은 본 실험에서 측정된 산소 삼중점과 그 실현 장치를 이용하여 표준백금저항온도계를 교정했을 때 ITS-90에서 정한 온도로부터 벗어날 수 있는 정도의 불확도를 정리한 것이다. 이 중 밀봉형 셀(sealed cell uncertainty)과 표준 저항(standard resistor)에 의한 불확도는 해당하는 시험 및 교정 성적서 상의 값을 인용한 것이다. 삼중점 저항비 값 결정(determination of the plateau value)은 그림 3의 결과를 이용한 것이며 삼중점의 반복도(plateau repeatability)는 여러 번 삼중점을 실현한 결과에서 계산한 것이다. 자기가열효과(self-heating)는 측정된 자기가열효과인 0.2 mK의 10%를 그 불확도로 추정하고 열유입 효과(heat-flux)는 3 차 캔의 온도를 변화시키며 삼중점을 실현했을 때의 삼중점 값의 변화로 추정하였다^[4]. 담금 깊이에 따른 압력 효과에 의한 불확도(hydrostatic head correction)는 셀 내의 액체 기둥의 길이를 3 cm로 계산하고 그 불확도를 1 cm로 추정하여 ITS-90에 정한대로^[1] 환산 상수 1.5 mK/m를 이용하여 온도로 환산한 것이다. 물의 삼중점에서 전파된 불확도(propagation from TPW uncertainty)는 물의 삼중점의 실현 불확도인 0.1 mK ($k=1$)에서 전파된 것을 명시한 것이다^[5]. 이상

의 결과를 종합하면 산소 삼중점에서의 표준백금저항 온도계를 교정한 불확도는 0.43 mK ($k=2$)이며, 이 온도 영역에서 0.1 mK 정도인 ITS-90의 부분구간 비유일성(non-uniqueness)^[6]을 포함하더라도 산소 삼중점에서 물의 삼중점 구간에서의 불확도는 1 mK 이하라는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

이번 실험을 통하여 저온에서 일반적으로 사용하는 초정밀 온도계인 캡슐형 표준백금저항온도계를 -220 °C에서 0.01 °C 까지의 영역에서 1 mK 이내의 불확도로 교정하는 것이 가능해졌다. 이러한 시스템을 이용하여 캡슐형 표준백금저항온도계의 교정은 물론이고, 이렇게 교정된 온도계를 기준기로 하여 -200 °C 이상의 영역에서 사용되는 롱스텝형 표준백금저항온도계 및 산업용 저항온도계, 각종 저온용 온도계를 비교교정하는 것도 가능해졌다.

참고 문헌

- [1] H. Preston-Tomas, "The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)", *Metrologia*, vol. 27, no. 1, pp. 3-10, 1990.
- [2] 강기훈, 김용규, 감기술, "캡슐형 백금저항온도계 국제비교를 위한 네온, 산소, 아르곤, 수은 및 물의 삼중점 실현", *센서학회지*, 제9권, 제3호, pp. 153-162, 2000.
- [3] F. Pavese, J. Ancsin, D. N. Astrov, J. Bonhoure, G. Bonnier, G. T. Furukawa, R. C. Kemp, H. Mass, R. L. Rusby, H. Sakurai and Ling Shan-Kang, "An international intercomparison of fixed points by means of sealed cells in the range 13.81 K - 90,686 K", *Metrologia*, vol. 20, no. 4, pp. 127-144, 1984.
- [4] 강기훈, 감기술, 김용규, 송창호, "전기 및 봉입형 응고점 셀 내의 온도구배가 미치는 표준백금저항온도계 온도측정의 불확도 요소 평가", *센서학회지*, 제13권 제6호, pp. 411-416, 2004.
- [5] 강기훈, 김용규, 감기술, "핵심국제비교용 물의 삼중점 셀 제작과 비교 실험 및 불확도 평가", *센서학회지*, 제13권, 제2호, pp. 114-120, 2004.
- [6] B.W. Mangum, P. Bloembergen, M. V. Chattle, B. Fellmuth, P. Marcarino and A. I. Pokhodun, "On the international temperature scale of 1990 (ITS-90)", *Metrologia*, vol. 34, no. 5, pp. 427-429, 1997.

양 인 석

- 센서학회지 제15권 제4호, p. 262 참조
- 현재 한국표준과학연구원 기반표준본부 선임연구원

송 창 호

- 센서학회지 제13권 제6호, p. 416 참조
- 현재 한국표준과학연구원 기반표준본부 책임연구위원

강 기 훈

- 센서학회지 제13권 제6호, p. 416 참조
- 현재 한국표준과학연구원 기반표준본부 책임연구위원

김 용 규

- 센서학회지 제13권 제6호, p. 416 참조
- 현재 한국표준과학연구원 기반표준본부 책임연구위원